注意增强短时程单眼剥夺效应*[1]

王珏[1,2], 何鑫[1,2], 鲍敏[1,2]

（[1]中国科学院心理研究所行为科学重点实验室，北京 100101）
（[2]中国科学院大学心理学系，北京 100049）

摘 要 将成年人的一只眼短时遮盖能提升该眼的眼优势，这被称为短时程单眼剥夺效应。最近发现，在某些双眼输入平衡的适应范式中，基于眼的注意可以使眼优势向非注意眼偏移。由于单眼遮盖会阻断一只眼的所有输入，注意显然会被分配到另一只眼。因此，短时程单眼剥夺效应据猜测也可能受基于眼的注意调节，只是尚缺乏证据支持。本文在被试单眼遮盖剥夺的同时让他们完成一个注意追踪任务。一小时的追踪任务前后，用双眼竞争测量眼优势的变化。结果显示，当双眼竞争的测试光栅与追踪任务的目标光栅具有一致的视觉特征时，剥夺效应幅度更大；当测试光栅与追踪任务的干扰光栅特征一致时，剥夺效应幅度相对更小。该结果首次表明，注意能增强短时程单眼剥夺效应。

关键词 单眼剥夺，眼优势，注意，双眼竞争

1 引言

眼优势可塑性是研究经验依赖性大脑可塑性的经典模型。自上世纪 60 年代以来，众所周知，在出生后的一段时间内（即所谓的“关键期”），遮挡一只眼睛的视觉输入可以使视觉皮层在结构和生理上发生长期性变化(Wiesel & Hubel, 1963)。然而，最近的研究表明，眼优势可塑性不仅限于关键期(Lunghi et al., 2011)。在 Lunghi 等人（2011）的研究中，通过双眼竞争任务来测量知觉眼优势。双眼竞争是指两个不相同但视网膜位置重叠的图像分别呈现给被试的两只眼，它们会相互竞争以进入意识。研究结果显示，成年被试在单眼遮盖剥夺 2.5 小时后，能更频繁地感知到剥夺眼的图像，这表明眼优势向剥夺眼发生了转移(Lunghi et al., 2011)。该效应后来被称为短时程单眼剥夺效应，并在此后的十几年中受到广泛关注(Binda et al., 2018; Lunghi, Berchicci, et al., 2015; Lunghi et al., 2013; Lunghi, Emir, et al., 2015; Min et al., 2018; Song, Wang, et al., 2023; Virathone et al., 2021; Zhou et al., 2015; Zhou et al., 2014)。

为了进一步理解这种眼优势可塑性背后的机制，研究者们探索了除单眼遮盖以外的多

[1] *通信作者：何鑫，Email: hex@psych.ac.cn; 鲍敏，E-mail: baom@psych.ac.cn

种单眼剥夺形式(Bai et al., 2017; Lyu et al., 2020; Wang et al., 2017; Yao et al., 2017; Zhou et al., 2014)。通过改变低阶的视觉输入，包括单眼图像的能量信息（例如在某一朝向或空间频率范围内的对比度）和相位信息（例如轮廓），也可以导致眼优势明显向剥夺眼偏移。根据这些前人的实验发现，人们认为短时程单眼剥夺效应主要源于早期视觉皮层，这个观点也得到了神经生理学和神经影像学研究的支持(Binda et al., 2018; Lunghi, Berchicci, et al., 2015; Zhou et al., 2015)。

除了典型的短时程单眼剥夺效应之外，最近一些基于眼的长时注意的研究报告了一种出人意料的眼优势可塑性的新形式(Song, Lyu, & Bao, 2023; Song, Lyu, Zhao, et al., 2023; Wang et al., 2021)。具体来说，在两只眼的视觉输入保持平衡的前提下，操纵注意引向某一只眼，经过一段时间后，可以发现被试的眼优势得到重塑，这里操纵注意的方式可以是通过给一只眼睛佩戴普罗棱镜，使这只眼所视的图像上下颠倒(Wang et al., 2021)，也可以是给一只眼呈现正常的电影片段，给另一只眼呈现内容相同但倒放的片段(Song, Lyu, & Bao, 2023; Song, Lyu, Zhao, et al., 2023)。

基于眼的注意本身可以改变眼优势这一发现，为研究高级认知加工对眼优势可塑性的影响开启了新的可能性。考虑到在单眼剥夺期间，注意应该偏向非剥夺眼，一个有趣的问题由此产生：注意是否也会影响典型的短时程单眼剥夺效应呢？这是一个全新的问题，因为典型的单眼剥夺会移除单眼输入的所有或部分信息，而在基于眼的注意研究中两只眼视觉输入的基本特征和轮廓信息都得以保留并保持眼间平衡(Song, Lyu, & Bao, 2023; Song, Lyu, Zhao, et al., 2023; Wang et al., 2021)。有人可能会指出，在使用倒置棱镜时，非注意眼中的面孔和生物运动构型的整体加工(Sumi, 1984; Tanaka & Farah, 1993)可能会受到干扰(Wang et al., 2021)。然而，在离眼倒放视频适应范式中(Song, Lyu, & Bao, 2023; Song, Lyu, Zhao, et al., 2023)，情况却并非如此。基于此，这两种适应范式不能简单地被视为典型的短时程单眼剥夺。所以在基于眼的注意研究中的发现，未必能回答注意是否影响典型的短时程单眼剥夺效应这一问题。

我们注意到，最近有一篇研究已经尝试探索了这一问题(Chen et al., 2020)。在单眼遮盖剥夺期间，研究者要求被试玩有声的动作视频游戏，或观看静音的动作视频游戏的回放视频，或者玩非动作电子游戏。然而，在这三种条件下的眼优势的偏移程度并不存在显著差异。因此，他们得出结论认为短时程单眼剥夺效应不受注意的影响。然而，我们需谨慎看待基于这一阴性结果得出的结论，因为他们的实验方法上可能存在一些不足之处。首先，他们没有直接评估三种条件下的注意水平。其次，他们使用了双眼相位整合任务而非双眼

竞争任务来测量眼优势。已有研究发现，使用这两个任务测量的短时程单眼剥夺效应并不总是一致的(Bai et al., 2017)。

为了解决这些潜在的问题，在本研究中我们设计了一种新的实验任务，以严格控制单眼剥夺期间被试的视觉注意水平。具体而言，在一只眼被遮盖的同时，被试需要对两组光栅中的一组进行视觉注意追踪。追踪任务中的目标光栅和干扰光栅有明显不同的基本视觉特征。此外，它们还在单眼遮盖剥夺前后的双眼竞争任务中作为测试光栅。我们假设，如果注意可以调节短时程单眼剥夺效应，那么当单眼遮盖期间的测试光栅与目标光栅的特征一致时，眼优势的转移效应将会更明显。此外，在 Chen 等人（2020）的研究中，注意水平的操控是通过跨不同次的单眼剥夺来实现的。而在本研究中，对注意水平的操纵可以在单次单眼剥夺内实现。因此，我们的实验设计可能有助于避免由不同次单眼剥夺之间的效应波动而引入的对短时程单眼剥夺效应的干扰。

2 方法

2.1 被试

共有 20 名被试（4 男 16 女，18～28 岁）参加了本实验。被试量依据该领域内前人研究使用的被试量而定(Binda et al., 2018; Lyu et al., 2020; Menicucci et al., 2022; Virathone et al., 2021)。所有被试裸眼视力或矫正视力正常，并都在实验前签署了知情同意书，均不了解实验目的。本研究符合赫尔辛基宣言的伦理标准，并获得中国科学院心理研究所的机构审查委员会批准。

2.2 设备

实验程序是利用 MATLAB 2021a 的心理学工具箱编写的(Brainard, 1997; Pelli, 1997)。刺激呈现在 DELL P1230 CRT 显示器上(分辨率为 1600×1200，刷新率为 75 Hz)。实验前使用 Photo Research PR-655 光度计对显示器进行校正，显示器的平均亮度为 44.7 cd/m^2。实验全程在黑暗的房间中进行，被试通过立体镜离眼观看显示器屏幕上的刺激，眼睛与屏幕的距离为 70 cm。通过使用额托架来辅助减少头部的活动。

2.3 刺激

2.3.1 练习阶段的双眼竞争任务

在初步练习阶段的双眼竞争任务中，刺激为两个正交的正弦光栅（直径：1°，空间频率：2 cpd，Michelson 对比度：80%），光栅的边缘通过高斯滤波进行模糊处理。光栅的朝向为±45°。这两个光栅分别呈现在每只眼睛的视野中央。为了促使稳定的双眼融合，实验还给两只眼同时呈现了中央红色注视点（直径：0.07°）和高对比度的棋盘格外框（大小：2.5°×2.5°，厚度：0.25°）。

双眼竞争任务的每个试次持续 1 分钟，前 5 s 呈现空屏，剩余 55 s 呈现光栅刺激。一旦光栅刺激出现，要求被试盯住红色注视点，并根据感知到的光栅朝向（45°，–45°或两个朝向的混合）按键盘上相应的键（右箭头、左箭头或下箭头）。需要注意的是，在单个试次中，呈现给双眼的光栅朝向保持一致，光栅朝向在试次间随机变化。

2.3.2 正式实验阶段的双眼竞争任务

在正式的实验阶段，前后测使用双眼竞争任务来测量眼优势变化。刺激包括两种不同类型的彩色正交正弦光栅（图 1A）。一种是一对朝向正交的圆形红绿光栅（直径：1°，朝向：±45°，空间频率：1 cpd，Michelson 对比度：80%，相位：0 或π）。另一种刺激是一对朝向正交的方形黄蓝光栅（直径：1°，朝向：±45°，空间频率：3 cpd，Michelson 对比度：80%，相位：0 或π）。由于这两种测试光栅在各种基本特征（颜色、形状和空间频率）上都不同，所以它们可能会分别激活早期视觉皮层中彼此相对不重叠的神经群体。

每个试次持续 1 分钟，前 5 s 呈现空屏，随后 55 s 呈现光栅刺激。在每个试次中，给被试的双眼都呈现红绿光栅（a）或黄蓝光栅（b）。每个双眼竞争任务共有 16 个试次，刺激光栅的呈现顺序在试次间平衡。呈现的顺序是事先确定的，遵循 abbabaabbaababba 或 baababbaabbabaab 顺序，所以红绿测试光栅和黄蓝测试光栅各呈现 8 个试次。为了防止视觉后效，光栅刺激的相位值（0 或π）和朝向（±45°）在试次内保持不变，但在试次间随机切换。重要的是，后测使用的刺激光栅与对应前测中使用的刺激相同，并且呈现顺序也完全一致。

2.3.3 单眼剥夺

为了进行单眼剥夺，实验使用半透明眼贴对被试的优势眼（即剥夺眼，根据前测的双眼竞争任务结果而定）进行遮盖。在单眼遮盖剥夺的全程，要求被试的被遮盖眼保持睁开的状态。因为最近有研究发现，在单眼遮盖剥夺时，被遮盖眼保持睁开会比闭着诱发更大的单眼剥夺效应(Chen et al., 2023)。

2.3.4 注意追踪任务

在追踪任务中使用的主要刺激是彩色光栅，与前后测双眼竞争任务中使用的光栅一致（图 1B），共有 10 个红绿光栅和 10 个黄蓝光栅刺激。这些光栅在一个 18°×18°的灰色正方形区域内独立、平滑地朝着随机方向运动。为了使它们的运动看起来像刚体运动，我们设定，它们与其他光栅、正方形的任一边界或注视点一旦相撞则反弹(He et al., 2021)。并且反弹会在实际接触之前就发生，就好像光栅有一个厚度为 10%直径的透明外壳，这样做可以减少视觉拥挤和任务难度。反弹角度的计算与真实的物理碰撞相同，但是速度始终保持恒定。此外，我们选取电视剧《爱情公寓》的画面进行灰度处理后，使其环绕着正方形作为背景，以丰富非剥夺眼的视觉刺激。

追踪任务包含两个注意条件：注意红绿光栅和注意黄蓝光栅。每次实验开始时，屏幕中央出现指导语，提示被试全程把注意投放于红绿光栅或黄蓝光栅其中的一种光栅上，并且忽略另一种光栅。3 s 后出现一个 18°×18°大小的灰色正方形，其中有 10 个红绿光栅和 10 个黄蓝光栅在随机位置上以随机的方向运动，且有一张灰度图片围绕着正方形作为背景。所有光栅的朝向均为水平朝向或竖直朝向。5～10 s 后，其中一个红绿光栅和一个黄蓝光栅将改变自身朝向至 45° 或 –45°。这两个光栅中的一个为目标光栅。例如，在注意红绿光栅的条件下，朝向倾斜的红绿光栅被定义为目标光栅，要求被试持续地注意并追踪目标光栅的运动。20～25 s 后，两个朝向倾斜的光栅变回至原来的朝向。与此同时，正方形的上方出现一行指导语，即“Click the target ball”。被试需要在 10 s 内尽可能又快又准地点击目标光栅当前的位置。接着屏幕上出现反馈，并持续 2 s。注意黄蓝光栅条件下的刺激与注意红绿光栅条件下的基本一致，不同的是被定义为目标光栅的是朝向倾斜的黄蓝光栅。

追踪任务每个试次的时长是 35～45 s，具体时长取决于被试的反应时。每 30 个试次结束后，被试有一段最长 20 s 的休息时间。实验控制彩色光栅呈现的时间共计 1 小时。如果该时长超过了 1 小时，则程序会在完成当前试次后自动终止。

2.4 流程

在正式实验开始之前，每位被试需要经过 3～6 天的双眼竞争任务练习。练习的目的是使他们尽可能地熟悉双眼竞争任务，并获得他们眼优势的稳定结果(Bao et al., 2018)。每个练习日包括四组双眼竞争任务。第一组是 5 分钟的热身，不纳入后续的数据分析。随后，进行三组双眼竞争任务，每组 16 分钟，每两组任务之间休息 10 分钟。如果被试在后三次

测试中眼优势结果波动范围在 10%以内，就视其为达到筛选标准，有资格结束练习并开始正式实验。

每个正式实验日，先开始一组 5 分钟的双眼竞争任务热身（使用与练习阶段一致的刺激），然后是 5 分钟的休息时间。接下来，被试需进行两组 16 分钟的双眼竞争前测，相邻两组之间休息 10 分钟。随后，对被试进行单眼遮盖剥夺的同时，要求被试完成追踪任务。完成追踪任务后，立即取下被试的眼贴，并进行一组 16 分钟的双眼竞争后测。由于每位被试需要在每个注意条件下重复实验两次，因此他们共需完成四次正式实验，每次实验都在不同的天进行。

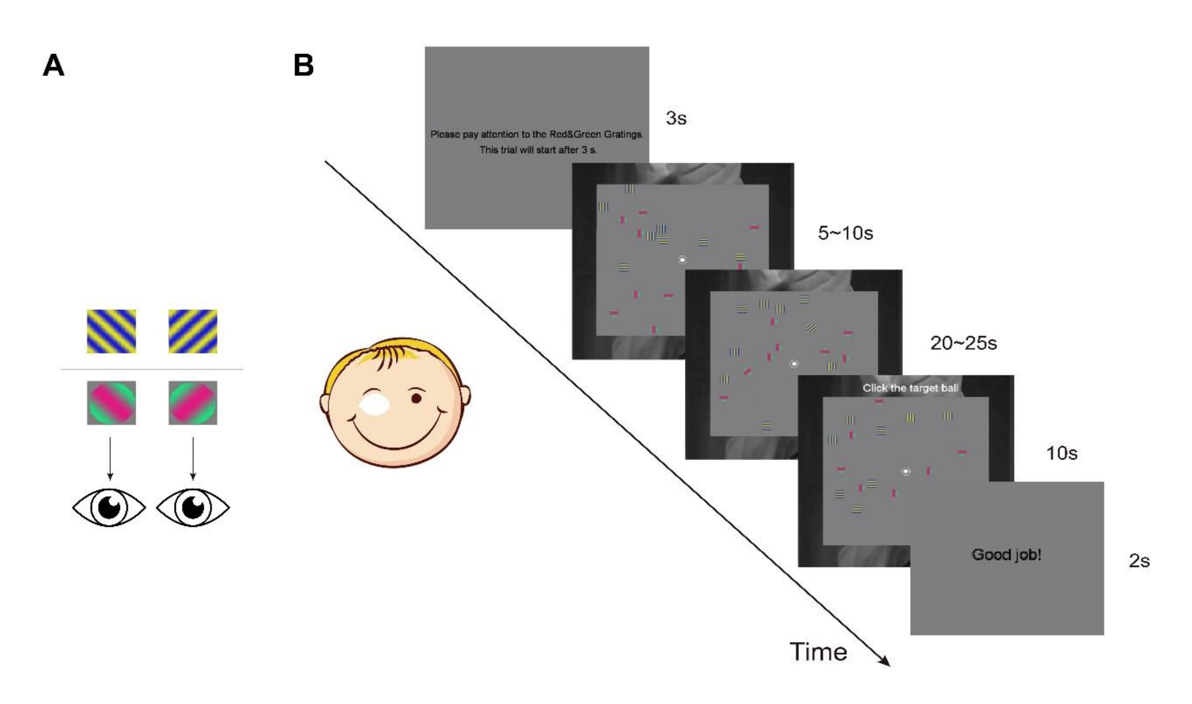


图 1 正式实验中双眼竞争任务使用的彩色光栅（A）、追踪任务中一个试次的图例（B）。

2.5 数据分析

为了量化每次双眼竞争任务测试的眼优势结果，我们计算了所有试次中单一知觉和混合知觉的总时长。在此基础上，我们使用以下公式计算了一个叫做眼优势指数（Ocular dominance index, ODI）的指标：

$$\text{Ocular dominance index} = \frac{T_{DE}}{T_{DE} + T_{NDE}}$$

其中 T_{DE} 代表知觉到呈现给剥夺眼的刺激的时长，T_{NDE} 代表知觉到呈现给非剥夺眼的刺激的时长。如果 ODI 大于 0.5，这就意味着剥夺眼在双眼竞争中占知觉的主导。我们使用三因素重复测量方差分析和 Tukey 多重比较检验来比较每次前测和后测的 ODI 结果。

3 结果

为了检验注意是否可以调节短时程单眼剥夺效应，我们对 ODI 结果进行了 2 (注意刺激: 红绿光栅、黄蓝光栅) × 2 (测试刺激: 红绿光栅、黄蓝光栅) × 2 (测试阶段: 前测、后测) 的重复测量方差分析 (图 2A)。结果显示，测试刺激的主效应显著 ($F(1,19) = 26.97$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.59$)，测试阶段的主效应也显著 ($F(1,19) = 18.89$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.50$)，后测的 ODI 结果大于前测 ODI, 这表明在遮盖剥夺结束之后剥夺眼的眼优势得到了提升。此外，注意刺激和测试刺激的二重交互作用显著 ($F(1,19) = 6.34$, $p = .021$, $\eta^2 = 0.25$)，测试刺激和测试阶段的二重交互作用也显著 ($F(1,19) = 21.68$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.53$)。更重要的是，注意刺激、测试刺激和测试阶段之间的三重交互作用显著 ($F(1,19) = 11.73$, $p = .003$, $\eta^2 = 0.38$)。

为了更好地理解这个三重交互作用显著结果的意义，我们将后测的 ODI 结果减去前测的 ODI 结果，得到“ODI 变化量”这一指标 (图 2B)，这样我们就可以比较在不同注意条件下使用不同测试刺激测量的短时程单眼剥夺效应大小。结果显示，在 ODI 变化量上，注意刺激和测试刺激两个因素的交互作用显著，该结果与上述的三重交互作用结果是一致的。考虑到使用不同类型的测试刺激衡量的双眼竞争结果缺少可比性，因此我们聚焦于比较不同注意条件下使用相同测试刺激得出的 ODI 变化量。我们发现，当测试刺激是黄蓝光栅时，注意黄蓝光栅条件下的 ODI 变化量 ($M = 0.023$, $SE = 0.006$)显著大于注意红绿光栅条件下的 ODI 变化量 ($M = 0.006$, $SE = 0.007$, $t(19) = –2.51$, $p = .021$, $d = –0.56$, 95% CI = [–1.027, –0.082], FDR-corrected $p = .042$)。当测试光栅是红绿光栅时，两种注意条件下的 ODI 变化量虽然没有显著差异，但也存在类似的趋势 (注意红绿光栅： $M = 0.081$, $SE = 0.018$, 注意黄蓝光栅： $M = 0.057$, $SE = 0.016$; $t(19) = 1.549$, $p = .138$, $d = 0.346$, 95% CI = [–0.110, 0.794])。这些结果表明，当测试刺激与追踪任务中的目标刺激特征一致时，短时程单眼剥夺效应会更大一些；当测试刺激与追踪任务中的干扰刺激特征一致时，剥夺效应的大小会相对小一些。当使用黄蓝测试光栅时，这个效应更为稳定。

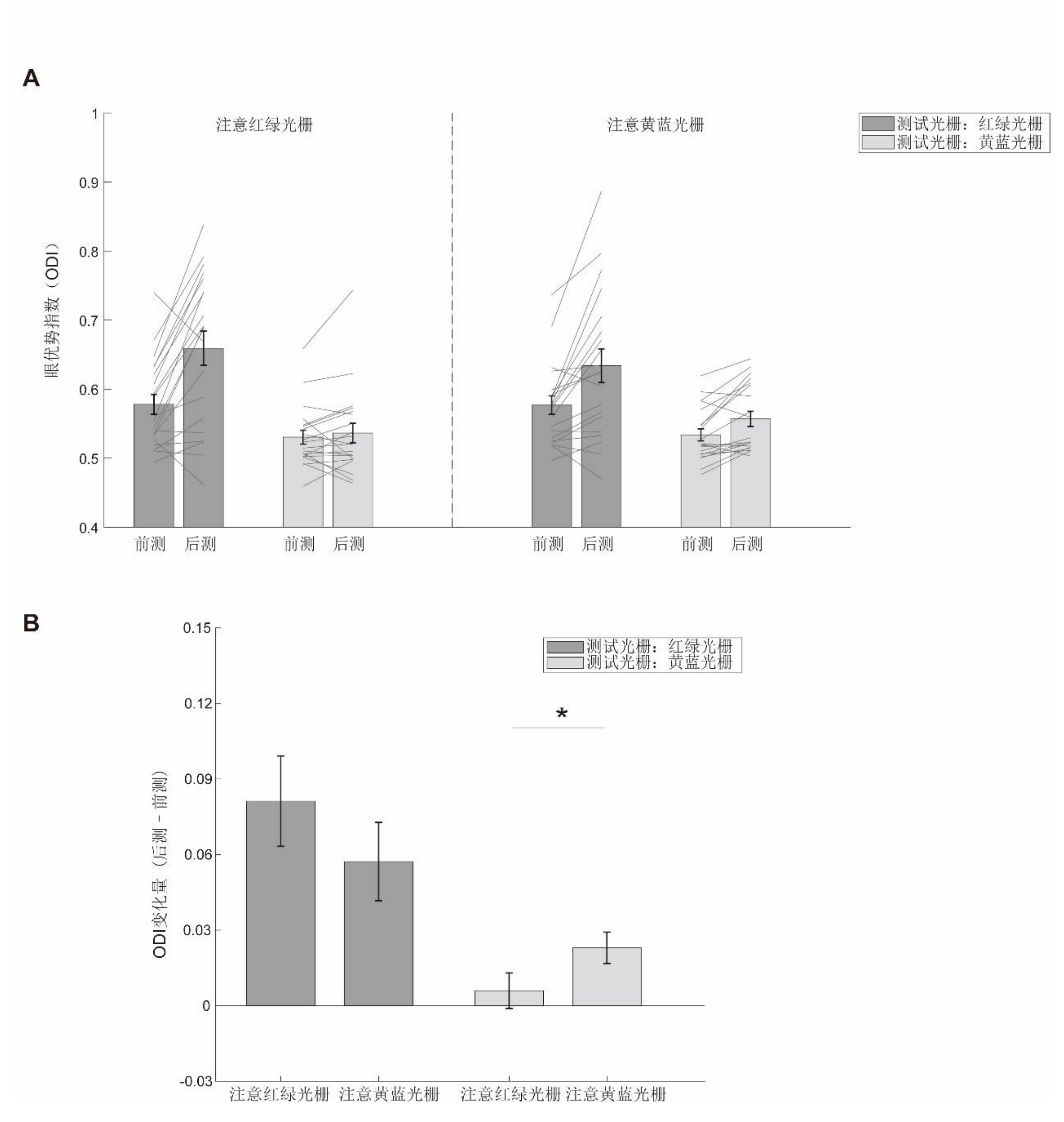


图 2 在不同注意条件下使用不同测试刺激得出的前后测 ODI 结果（A）。在不同注意条件下使用不同测试刺激得出的 ODI 变化量（B）。柱状图表示总体平均结果。灰线表示被试个体数据。误差线代表均值的标准误差。

4 讨论

本研究的目的是探索注意是否可以调节成年人的短时程单眼剥夺效应。根据我们的结果，这个问题的答案总的来说是肯定的。具体而言，我们发现在使用黄蓝光栅进行测试眼优势时，如果被试在单眼剥夺期间注意的也是黄蓝光栅刺激，那么测得的单眼剥夺效应明显更大，而反之如果他们注意的是红绿光栅刺激，则效应较小。在使用红绿光栅测试眼优势时，我们观察到了类似但不显著的趋势。

这一发现与前人研究(Chen et al., 2020)中所得出的阴性结论不符。在他们的研究中，单

眼剥夺期间的注意投入水平在不同次实验之间有所变化。这可能会引入次与次之间的效应波动，以至于他们没有检测到不同注意水平下单眼剥夺效应的显著差异。在注意负荷最强的条件中，他们让被试玩动作视频游戏，这是一项高度消耗注意资源的活动(Bavelier & Green, 2019)。在他们认为注意负荷更小的条件中，被试玩非动作视频游戏或仅仅观看静音的动作视频游戏的回放视频。然而，他们没有客观测量每个条件下的注意投入水平。观看静音动作视频游戏的回放视频条件下被试的注意水平也值得怀疑，因为难以排除被试在观看静音视频时投入了比作者预想的更多的注意的可能性。实际上，在某些情况下，与观看有声电影相比，人们在观看静音电影时可能会投入更多的视觉注意(Song, Lyu, Zhao, et al., 2023)。导致他们得出阴性结果的另一个潜在因素是，他们使用了双眼相位整合任务来测量眼优势。这个任务已被证明主要是探测 V1 视觉脑区中简单细胞的活动(Huang et al., 2010)。然而，在本实验中我们采用的双眼竞争任务可能涉及更广泛的神经加工群体(Bai et al., 2017)，其中一些可能对注意调节更为敏感(Tootell et al., 1998)。

本研究的一个意外发现是，使用红绿光栅测出的剥夺效应明显大于使用黄蓝光栅测出的剥夺效应。这个现象不太容易解释，因为据我们所知，在该领域的以往研究里双眼竞争任务中的彩色光栅刺激通常是红绿光栅或红蓝光栅，而不是黄蓝光栅(Animali et al., 2023; Binda et al., 2018; Kurzawski et al., 2022; Lunghi et al., 2013; Lunghi, Emir, et al., 2015; Nguyen et al., 2021; Virathone et al., 2021; Zhou et al., 2017)。我们知道，小细胞（P）通路对红绿色对比非常敏感，而粒状细胞（K）通路专门用于区分黄蓝颜色(Anssari et al., 2020)。过去的动物研究和对人类被试进行的单眼剥夺研究均表明，P 通路对视觉剥夺更加敏感(Binda et al., 2018; Horton & Hocking, 1997)。因此，我们猜测相对于 K 通路而言，短时程单眼剥夺可能会对 P 通路产生更强的影响。这种对 P 通路的强烈影响有可能使得我们使用红绿光栅测试眼优势时不巧地遇到了天花板效应，进而导致我们难以观察到这一测试条件下注意对单眼剥夺效应的明显调节作用。

总而言之，本研究提供了一些初步证据，支持注意在典型单眼剥夺效应中具有调节作用。我们的研究表明，短时程眼优势可塑性不仅仅由不平衡的视觉前馈输入决定，还受到自上而下的注意的反馈影响。这也揭示了高级认知功能和低级视觉加工在这一现象中有潜在的交互作用。由于单眼剥夺范式最近已被用于治疗弱视(Lunghi et al., 2019; Zhou et al., 2019)，我们的发现可能对未来的弱视治疗提供了临床意义。

参考文献

Animali, S., Steinwurzel, C., Dardano, A., Sancho-Bornez, V., Del Prato, S., Morrone, M. C., . . . Binda, P. (2023). Effect of fasting on short-term visual plasticity in adult humans. *The European Journal of Neuroscience*, *57*(1), 148–162. https://doi.org/10.1111/ejn.15873

Anssari, N., Vosoughi, R., Mullen, K., & Mansouri, B. (2020). Selective colour vision deficits in multiple sclerosis at different temporal stages. *Neuro-ophthalmology*, *44*(1), 16–23. https://doi.org/10.1080/01658107.2019.1615960

Bai, J., Dong, X., He, S., & Bao, M. (2017). Monocular deprivation of Fourier phase information boosts the deprived eye's dominance during interocular competition but not interocular phase combination. *Neuroscience*, *352*, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.03.053

Bao, M., Dong, B., Liu, L., Engel, S. A., & Jiang, Y. (2018). The best of both worlds: Adaptation during natural tasks produces long-lasting plasticity in perceptual ocular dominance. *Psychological Science*, *29*(1), 14–33. https://doi.org/10.1177/0956797617728126

Bavelier, D., & Green, C. S. (2019). Enhancing attentional control: Lessons from action video games. *Neuron*, *104*(1), 147–163. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.09.031

Binda, P., Kurzawski, J. W., Lunghi, C., Biagi, L., Tosetti, M., & Morrone, M. C. (2018). Response to short-term deprivation of the human adult visual cortex measured with 7T BOLD. *eLife*, *7*. https://doi.org/10.7554/eLife.40014

Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433–436. https://doi.org/10.1163/156856897x00357

Chen, X., Chen, S., Kong, D., Wei, J., Mao, Y., Lin, W., . . . Zhou, J. (2020). Action video gaming does not influence short-term ocular dominance plasticity in visually normal adults. *eNeuro*, *7*(3). https://doi.org/10.1523/eneuro.0006-20.2020

Chen, Y., Gao, Y., He, Z., Sun, Z., Mao, Y., Hess, R. F., . . . Zhou, J. (2023). Internal neural states influence the short-term effect of monocular deprivation in human adults. *eLife*, *12*. https://doi.org/10.7554/eLife.83815

He, X., Liu, W., Qin, N., Lyu, L., Dong, X., & Bao, M. (2021). Performance-dependent reward hurts performance: The non-monotonic attentional load modulation on task-irrelevant distractor processing. *Psychophysiology*, *58*(12), e13920. https://doi.org/10.1111/psyp.13920

Horton, J. C., & Hocking, D. R. (1997). Timing of the critical period for plasticity of ocular dominance columns in macaque striate cortex. *The Journal of Neuroscience*, *17*(10), 3684–3709. https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-10-03684.1997

Huang, C. B., Zhou, J., Zhou, Y., & Lu, Z. L. (2010). Contrast and phase combination in binocular vision. *PLoS One*, *5*(12), e15075. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015075

Kurzawski, J. W., Lunghi, C., Biagi, L., Tosetti, M., Morrone, M. C., & Binda, P. (2022). Short-term plasticity in the human visual thalamus. *eLife*, *11*. https://doi.org/10.7554/eLife.74565

Lunghi, C., Berchicci, M., Morrone, M. C., & Di Russo, F. (2015). Short-term monocular deprivation alters early components of visual evoked potentials. *The Journal of Physiology*, *593*(19), 4361–4372. https://doi.org/10.1113/JP270950

Lunghi, C., Burr, D. C., & Morrone, C. (2011). Brief periods of monocular deprivation disrupt ocular balance in human adult visual cortex. *Current Biology*, *21*(14), R538–R539. https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.06.004

Lunghi, C., Burr, D. C., & Morrone, M. C. (2013). Long-term effects of monocular deprivation revealed with

binocular rivalry gratings modulated in luminance and in color. *Journal of Vision*, *13*(6), 1. https://doi.org/10.1167/13.6.1

Lunghi, C., Emir, U. E., Morrone, M. C., & Bridge, H. (2015). Short-term monocular deprivation alters GABA in the adult human visual cortex. *Current Biology*, *25*(11), 1496–1501. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.04.021

Lunghi, C., Sframeli, A. T., Lepri, A., Lepri, M., Lisi, D., Sale, A., & Morrone, M. C. (2019). A new counterintuitive training for adult amblyopia. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, *6*(2), 274–284. https://doi.org/10.1002/acn3.698

Lyu, L., He, S., Jiang, Y., Engel, S. A., & Bao, M. (2020). Natural-scene-based steady-state visual evoked potentials reveal effects of short-term monocular deprivation. *Neuroscience*, *435*, 10–21. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.03.039

Menicucci, D., Lunghi, C., Zaccaro, A., Morrone, M. C., & Gemignani, A. (2022). Mutual interaction between visual homeostatic plasticity and sleep in adult humans. *eLife*, *11*. https://doi.org/10.7554/eLife.70633

Min, S. H., Baldwin, A. S., Reynaud, A., & Hess, R. F. (2018). The shift in ocular dominance from short-term monocular deprivation exhibits no dependence on duration of deprivation. *Scientific Reports*, *8*(1), 17083. https://doi.org/10.1038/s41598-018-35084-1

Nguyen, B. N., Malavita, M., Carter, O. L., & McKendrick, A. M. (2021). Neuroplasticity in older adults revealed by temporary occlusion of one eye. *Cortex*, *143*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.07.004

Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, *10*(4), 437–442. https://doi.org/10.1163/156856897x00366

Song, F., Lyu, L., & Bao, M. (2023). Adaptation of ocular opponency neurons mediates attention-induced ocular dominance plasticity. *Neuroscience Bulletin*. https://doi.org/10.1007/s12264-023-01103-z

Song, F., Lyu, L., Zhao, J., & Bao, M. (2023). The role of eye-specific attention in ocular dominance plasticity. *Cerebral Cortex*, *33*(4), 983–996. https://doi.org/10.1093/cercor/bhac116

Song, F., Wang, J., & Bao, M. (2023). From imbalanced visual inputs to imbalanced visual attention: Seeking the neural mechanisms for short-term ocular dominance plasticity. *Advances in Psychological Science*, *31*(10), 1873. https://doi.org/10.3724/sp.J.1042.2023.01873

Sumi, S. (1984). Upside-down presentation of the Johansson moving light-spot pattern. *Perception*, *13*(3), 283–286. https://doi.org/10.1068/p130283

Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1993). Parts and wholes in face recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *46*(2), 225–245. https://doi.org/10.1080/14640749308401045

Tootell, R. B., Hadjikhani, N., Hall, E. K., Marrett, S., Vanduffel, W., Vaughan, J. T., & Dale, A. M. (1998). The retinotopy of visual spatial attention. *Neuron*, *21*(6), 1409–1422. https://doi.org/10.1016/s0896-6273(00)80659-5

Virathone, L., Nguyen, B. N., Dobson, F., Carter, O. L., & McKendrick, A. M. (2021). Exercise alone impacts short-term adult visual neuroplasticity in a monocular deprivation paradigm. *Journal of Vision*, *21*(11), 12. https://doi.org/10.1167/jov.21.11.12

Wang, M., McGraw, P., & Ledgeway, T. (2021). Attentional eye selection modulates sensory eye dominance. *Vision Research*, *188*, 10–25. https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.06.006

Wang, Y., Yao, Z., He, Z., Zhou, J., & Hess, R. F. (2017). The cortical mechanisms underlying ocular dominance plasticity in adults are not orientationally selective. *Neuroscience*, *367*, 121–126. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.030

Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1963). Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *Journal of Neurophysiology*, *26*, 1003–1017. https://doi.org/10.1152/jn.1963.26.6.1003

Yao, Z., He, Z., Wang, Y., Lu, F., Qu, J., Zhou, J., & Hess, R. F. (2017). Absolute not relative interocular luminance modulates sensory eye dominance plasticity in adults. *Neuroscience*, *367*, 127–133. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.029

Zhou, J., Baker, D. H., Simard, M., Saint-Amour, D., & Hess, R. F. (2015). Short-term monocular patching boosts the patched eye's response in visual cortex. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *33*(3), 381–387. https://doi.org/10.3233/rnn-140472

Zhou, J., He, Z., Wu, Y., Chen, Y., Chen, X., Liang, Y., . . . Hess, R. F. (2019). Inverse occlusion: A binocularly motivated treatment for amblyopia. *Neural Plasticity*, *2019*, 5157628. https://doi.org/10.1155/2019/5157628

Zhou, J., Reynaud, A., & Hess, R. F. (2014). Real-time modulation of perceptual eye dominance in humans. *Proceedings. Biological Sciences*, *281*(1795). https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1717

Zhou, J., Reynaud, A., Kim, Y. J., Mullen, K. T., & Hess, R. F. (2017). Chromatic and achromatic monocular deprivation produce separable changes of eye dominance in adults. *Proceedings. Biological Sciences*, *284*(1867). https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1669

Attention enhances short-term monocular deprivation effect

Abstract

Patching one eye of an adult human for a few hours has been found to promote the dominance of the patched eye, which is called short-term monocular deprivation effect. Interestingly, recent work has reported that prolonged eye-specific attention can also cause a shift of ocular dominance towards the unattended eye though visual inputs during adaptation are balanced across the eyes. Considering that patching blocks all input information from one eye, attention is undoubtedly deployed to the opposite eye. Therefore, the short-term monocular deprivation effect might to some extent be contributed by the eye-specific attentional modulation, which remains largely unknown. The goal of the present study was to investigate whether attention can modulate the short-term monocular deprivation effect in adults.

Twenty adult participants took part in the present study. We asked participants to perform an attentive tracking task throughout the monocular patching. During the tracking, the primary stimuli consisted of two types of chromatic gratings, red-green gratings (R-G) and yellow-blue (Y-B) gratings, one of which was defined as the target gratings (attended stimuli) and the other as the distractor gratings (unattended stimuli). Target gratings and distractor gratings were distinct from each other in fundamental visual features such as color, shape, and spatial frequency. We instructed participants to continuously attend to and track the movement of the target grating in

the attentive tracking task. Before and after one hour of monocular patching, we measured participants' ocular dominance using a binocular rivalry task in which both target gratings and distractor gratings served as testing stimuli.

In case there lacks of comparability in binocular rivalry performance measured with different types of testing stimuli, we focused on the comparison of the monocular deprivation effect for the same testing stimuli between different attention conditions. Our results generally support the notion of attentional modulation on the monocular deprivation effect. To be specific, we observed a larger shift of ocular dominance towards the deprived eye when the binocular rivalry testing gratings shared features with the target gratings during the tracking compared to when they shared features with the distractor gratings. For testing with Y-B gratings, there was a significantly greater monocular deprivation effect when Y-B gratings were attended during the patching compared to when R-G gratings were attended. For testing with R-G gratings, we detected a similar trend, though it did not reach statistical significance.

In conclusion, the present study provides some preliminary evidence supporting the modulatory role of attention in the effect of typical monocular deprivation. Our work suggests that short-term ocular dominance plasticity is not solely determined by imbalanced visual feedforward inputs, but also affected by top-down attentional feedbacks, discovering potential interplays between higher-level cognitive functions and lower-level visual processing in this phenomenon. Because monocular deprivation has recently been used to treat amblyopia, our finding of attentional modulation on this effect may provide useful clues on how to optimize such treatment in future work.

Keywords monocular deprivation, ocular dominance, attention, binocular rivalry